

EH690 高强钢焊管焊接工艺及质量控制

甘正红¹, 宋文杰¹, 邢艳亮², 张坤鹏³, 梁才萌⁴, 方晓东⁵

- (1. 江苏德创制管有限公司, 江苏 兴化 225700;
2. 河北省特种设备监督检验研究院唐山分院, 河北 唐山 063000;
3. 番禺珠江钢管(连云港)有限公司, 江苏 连云港 222006;
4. 帕博检测技术服务有限公司华东分公司, 江苏 连云港 222006;
5. 江苏通宇钢管集团有限公司, 江苏 扬州 225008)

摘 要: 为了获得性能优良的海洋工程用 EH690 焊管焊接接头, 开展了 EH690 高强钢焊接工艺研究, 针对 EH690 焊管进行了气体保护焊和埋弧焊组合工艺的焊接工艺评定试验, 对焊接接头进行了无损检测和力学性能试验, 并提出了相应的生产过程质量控制措施。结果表明, 采取预热、控制层间温度、后热和保温缓冷、合理匹配焊材、低热输入焊接参数等焊管生产过程严格的质量控制措施, 可获得性能优良的焊接接头。该工艺和质量控制措施已在铺管船和起重机臂架用焊管的批量生产中得到应用, 可满足焊接结构的使用安全要求。

关键词: EH690 高强钢; 焊管; 焊接工艺; 无损检测; 力学性能

中图分类号: TG457.14

文献标识码: B

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2022.05.008

Welding Process and Quality Control of EH690 High Strength Steel Welded Pipe

GAN Zhenghong¹, SONG Wenjie¹, XING Yanliang², ZHANG Kunpeng³,
LIANG Caimeng⁴, FANG Xiaodong⁵

- (1. Jiangsu DeChuang Manufacturing Pipe Co., Ltd., Xinghua 225700, Jiangsu, China;
2. Hebei Special Equipment Supervision and Inspection Institute of Tangshan Branch, Tangshan 063000, Hebei, China;
3. Panyu Chu Kong Steel Pipe (lianyungang) Co., Ltd., Lianyungang 222006, Jiangsu, China;
4. Pabo Testing Technology Service (huadong) Co., Ltd., Lianyungang 222006, Jiangsu, China;
5. Jiangsu Tongyu Steel Pipe Group Co., Ltd., Yangzhou 225008, Jiangsu, China)

Abstract: In order to obtain the welded joint of EH690 welded pipe for offshore engineering with excellent performance, the welding process of EH690 high strength steel was studied, the welding process qualification test of the combined process of gas shielded arc welding and submerged arc welding of welded pipe was carried out, the nondestructive testing and mechanical properties test of the welded joint EH690 were carried out, and the production process quality control measures were put forward. The results show that the welded joint with excellent performance can be obtained by the strict quality control measures of pre-heating, controlling the temperature between layers, post-heating, heat preservation and slow cooling, reasonably matching welding materials and low heat input welding parameters. The process and quality control measures have been applied in the batch production of welded pipes for pipe laying ship and crane boom, which can meet the requirements of use safety of welded structure.

Key words: EH690 high strength steel; welded pipe; welding process; nondestructive testing; mechanical properties

0 前言

随着海底管线、海上风力发电、钻井平台和海上打捞等海洋工业的蓬勃发展，海上起重设备（浮吊和起重机）、风电安装船、多功能铺管船等海洋工程结构和装备产品需求量巨大，而这些产品的起升臂架主要采用 EH690 高强钢焊管，以减轻自身质量，提高承载能力和抗冲击性能。由于这些海洋结构的应用领域环境复杂，对其焊接接头的力学性能，特别是低温冲击韧性的要求比普通结构钢高很多，因此，高强钢焊管的焊接接头质量控制成为保证结构的服役寿命和使用安全性的关键技术和核心问题。

本研究开展了 EH690 焊管的焊接工艺试验，

通过焊材匹配、焊前预热、层间温度控制、焊接参数优化、焊接过程质量控制、焊后消氢和保温缓冷等措施对焊接质量进行控制，并对焊接接头进行了无损检测和力学性能试验，最终获得性能优良的焊接接头。

1 EH690 高强钢性能

1.1 化学成分和力学性能

根据 CCS《材料与焊接规范》，EH690 钢板的交货状态为淬火加回火，对 EH690 高强钢的化学成分和力学性能进行检测，测试结果见表1和表 2，同时测得母材的维氏硬度值为 240HV₁₀~275HV₁₀。

表 1 EH690 钢的主要化学成分

%

$w(\text{C})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{P})$	$w(\text{S})$	$w(\text{Nb})$	$w(\text{V})$	$w(\text{Ti})$
0.15	0.19	1.4	0.01	0.002	0.021	0.023	0.011
$w(\text{Cu})$	$w(\text{Cr})$	$w(\text{Ni})$	$w(\text{Mo})$	$w(\text{B})$	$w(\text{N})$	$w(\text{Al})$	CEV
0.033	0.24	0.043	0.12	0.002	0.003 3	0.031	0.462

表 2 EH690 钢的力学性能

$R_{\text{elt}}/\text{MPa}$	R_{m}/MPa	$A/\%$	$A_{\text{KV}}/\text{J} (-40\text{ }^{\circ}\text{C})$
740	845	22	220、200、180

1.2 焊接性分析

通过对原材料钢板的化学成分及力学性能测试可知，EH690 高强钢的碳当量较高，可焊性较差，并且由于钢中加入了多种提高淬透性的合金元素，且合金元素含量较高，如用 Mo-Cr 微合金化和 Nb-V-Ti 复合微合金化，则屈服强度高，淬硬倾向大，因此焊接时冷裂纹倾向尤其严重。另外，焊接热影响区受加热温度和冷却速度的影响，易形成淬硬组织，且易产生冷裂纹；由于 EH690 钢强度高，钢管直径小，壁厚大，因此增加了钢管折弯时的管坯成型应力和焊接残余应力。

由表 1、表 2 所示钢的化学成分和力学性能测试结果以及焊接性分析可知，EH690 焊管在焊接过程中存在三个问题，一是热影响区的软化，二是热影响区的脆化，三是焊接冷裂纹，其中焊接冷裂纹是最关键的问题。

2 焊接工艺设计和开发

通过对焊接性能的分析，EH690 钢有明显脆硬和冷裂纹倾向，冷裂纹是由显微组织、应力和氢含量综合作用而导致的局部开裂（晶内或穿晶开裂），即产生冷裂纹的三个要素是扩散氢、淬硬组织和拘束应力。因此，如何改善焊缝组织、减少扩散氢含量和残余应力，是控制 EH690 焊管焊接冷裂纹产生的主要工艺措施。因此，焊接工艺应采用小热输入量的单丝多层多道埋弧焊，辅以焊前预热、控制层间温度（不推荐采用太高的层间温度，层间温度不应低于预热温度）、焊后消氢热处理以及保温缓冷。同时应尽量减小拘束度及合理安排焊道次序（焊道宽度控制在 15 mm 左右、焊层厚度控制在 4~6 mm），降低焊缝的残余应力，选择低强配比的低氢焊材。最终确定采用 80%Ar+20%CO₂ 的 GMAW 合缝和预焊打底的双面单丝多层多道埋弧焊工艺。

2.1 焊前预热及层间温度的控制

焊前预热可降低焊后冷却速度，适当延长 t_{85} ，减少或避免淬硬组织马氏体的形成，并可减少焊

接残余应力, 加快扩散氢的逸出, 因此焊前预热能有效地防止焊接冷裂纹的发生。预热温度的确定主要依据钢种的化学成分、淬硬倾向大小、板厚、冷却条件、拘束度、预热方式、焊接线能量、焊缝金属氢含量及施焊环境等因素。

日本伊藤等根据钢的化学成分、板厚、扩散氢含量建立了冷裂敏感指数 P_{cm} 、冷裂纹敏感性 P_w 的计算公式为

$$P_{cm} = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B \quad (1)$$

$$P_w = P_{cm} + [H]/60 + h/600 \quad (2)$$

式中: $[H]$ ——熔敷金属中扩散氢含量, mL/100 g (甘油法);

h ——板厚, mm。

当 $P_w > 0$ 时, 即有产生裂纹的可能性。

公式 (2) 的适用条件是扩散氢含量 $[H] = 1.0 \sim 5.0$ mL/100 g, $h = 19 \sim 50$ mm, 线能量为 17~30 kJ/cm。该公式不仅考虑了化学成分的影响, 还考虑到钢板厚度以及熔敷金属中的氢含量。

利用公式 (1) 和 (2) 可以计算出焊缝防止冷裂纹所需的预热温度 T_0 (°C), 即

$$T_0 = 1440P_w - 392 \quad (3)$$

根据本研究中 EH690 钢的化学成分、钢板厚度和熔敷金属扩散氢含量计算出防止冷裂纹的最低预热温度应大于 150 °C, 根据相关标准规定并结合有关文献, 确定预热温度上限为 200 °C, 层间温度不低于预热温度, 最高不超过 200 °C。过高的预热温度造成焊工操作环境恶劣并且会降低焊缝和热影响区的冷却速率, 引发奥氏体向铁素体或贝氏体转变, 导致强度、韧性下降; 过高的层间温度易产生热裂纹和较大的应力。采用履带式电加热片在焊缝坡口两侧不少于 150 mm 范围进行加热, 预热温度的测量点应在预热面的反面, 宜采用跟踪预热方式并用温控设备实时测温。

2.2 焊接热输入的控制

控制焊接时的冷却速度是防止焊接产生冷裂纹及焊缝热影响区脆化的关键。快速冷却对防止脆化有利, 但对防止冷裂纹不利; 反之, 减缓冷却速度可防止冷裂纹, 却易引起热影响区的脆化。因此必须找到两者兼顾的最佳冷却速度, 而冷却速度主要由焊接热输入决定, 但又受到焊件散热

条件和预热等因素影响。

冷却时间 $t_{8/5}$ 是决定高强钢焊接接头性能的一个重要参数, 冷却时间主要取决于焊接热输入、预热温度和层间温度。每种低碳调质钢有各自的最佳 $t_{8/5}$, 在这冷却速度下, 使得热影响区具有良好的抗裂性能和韧性。 $t_{8/5}$ 可以通过试验或者借助钢材的焊接 CCT 曲线来确定, 然后根据该 $t_{8/5}$ 来确定出焊接热输入。通过试验, 焊接热输入控制在 26 kJ/cm 以下可使热影响区获得较高的冲击韧性。

2.3 焊后紧急后热和保温缓冷

焊后紧急后热即在焊管外焊完成后必须“立即”加热到 280 °C±20 °C 并保持 2 h。后热的主要作用是提高冷却时间, 促进焊缝中的扩散氢尽快逸出, 降低焊缝和热影响区的氢含量, 同时降低残余应力, 改善焊缝淬硬组织, 因此又称“焊后消氢热处理”, 对预防冷裂纹效果明显。保温缓冷即在后热时间结束后采用保温材料 (一般用硅酸铝纤维毯) 覆盖焊缝, 使其自然冷却至室温, 也有利于焊缝扩散氢逸出, 降低焊缝氢含量。

2.4 焊材的选择

选择低氢的焊接材料, 必要时需测定焊材的扩散氢含量 (熔敷金属氢含量一般要求 <5 mL/100 g)。焊材的选择采用低强等韧性匹配的原则, 选择焊缝韧性不低于管体母材金属的焊材来匹配焊接接头能改善焊缝塑性, 也可减轻接头的拘束应力, 从而减小冷裂纹倾向。经过摸索试验, 焊材基本实现了国产化。其中, GMAW 预焊和打底焊选择牌号 THQ80-1 焊材, 型号 ER80-G (ER110S-G); 埋弧焊丝和焊剂牌号 BHG-4M/XUN-123, 型号 F76A6-EG。以上焊材匹配不仅力学性能得到满足, 而且具有良好的焊接性能。研究表明在增加焊缝强度的同时也能提高韧性, 当焊丝中 $w(Ni) = 1.4\%$ 、抗拉强度为 780 MPa 时, 强度接近标准要求值的下限, 后增加至 $w(Ni) = 2.6\%$ 时, 抗拉强度达到 820 MPa 以上, 满足标准规定值的要求。有文献指出, 增加 Ni 含量还可以减少焊缝中侧板条铁素体来控制冷裂纹的产生。

2.5 焊接工艺参数

经过焊接工艺分析与设计, 板厚 26 mm 的 EH690 钢焊接工艺参数见表 3。

表 3 EH690 钢焊接工艺参数表

焊接方法	焊材牌号	焊丝 直径/mm	干伸长/ mm	极性	焊接电流/A (±10%)	焊接电压/V (±7%)	焊接速度/(mm·min ⁻¹) (±15%)	线能量/ (kJ·cm ⁻¹)
打底 GMAW	THQ80-1	1.2	15~20	DCEP	260	28	380	≤ 22
填充和盖面 SAW	BHG-4M/XUN-123	4.0	25~40	DCEP	600	30	550	≤ 26

注：其他工艺措施：①GMAW 气体流量为 20 L/min；②预热温度 150~200 ℃；③层间温度大于预热温度且 ≤ 200 ℃；④后热消氢处理 (280±20) ℃/2 h。

3 焊管焊接生产过程质量控制

由于焊缝采用 X 形坡口，外焊前需进行碳弧气刨清根，多层多道焊的焊接量大、焊接时间长，如何保证整个焊接过程的温度对焊接生产过程质量控制至关重要。

3.1 焊材的储存控制

氢是引起高强钢冷裂纹的主要原因，焊接材料的烘干与保管着眼于控制扩散氢的来源，是降低扩散氢浓度最有效可行的措施，因此使用前应满足：①焊丝去除油、锈；②保护气体保持干燥；③焊剂严格烘干，烘干温度为 300~350 ℃，保温 2 h，经烘干之后可放入保温箱内（100~150 ℃）待用。焊材质量管理满足 JB/T 3223—2017《焊接材料质量管理规程》的要求。

3.2 下料

采用机械铣边的方式加工坡口，几乎没有热影响区。产生冷裂纹的原因之一是焊缝存在应力且夹杂扩散氢，因此坡口加工后应对坡口边缘的水分、氧化皮、铁锈、油污等进行彻底清除，保证坡口边缘至少 25 mm 范围经修磨后露出金属光泽。焊接坡口形式及尺寸如图 1 所示。

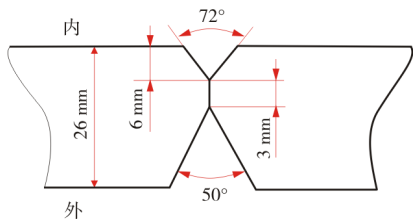


图 1 焊接坡口形式及尺寸示意图

3.3 成型工艺控制

控制好成型后的管坯圆度、开口尺寸、噤嘴量和直边量，以减小成型合缝时的拘束应力。

3.4 合缝和焊接引熄弧板

使用合缝机对钢管进行合缝，合缝时控制错

边量小于 1 mm，并进行牢固的定位焊，焊前需对焊接区域进行 150~200 ℃的预热，在焊接过程中也可采用火焰烘烤的方式保持预热温度。引熄弧板需采用同厚度的 EH690 钢板，引熄弧板应焊平、焊牢、坡口对正且平直。

3.5 预焊

对钢管焊缝进行全长范围的打底预焊，焊前需对焊接区域进行 150~200 ℃的预热，预焊完成后，应及时进行内焊。打底焊缝最终将被气刨清根去除。

3.6 内焊

使用电加热片进行 150~200 ℃的预热，焊接过程中应用烘枪火焰在钢管外部对即将焊接的区域进一步预热，火焰芯距焊缝表面的距离应 >50 mm，以维持预热温度。多层多道焊的层间温度不低于预热温度且不高于 200 ℃。

3.7 气刨清根

内焊后立即通过碳弧气刨在钢管外部对焊缝进行清根，预焊缝需要完全清除。若焊后未及时对焊缝清根，导致温度低于 150 ℃，需先预热至 150 ℃后，方可进行清根，以免因为碳刨造成淬硬组织。清根后需用磨光机修磨坡口内外的气刨积碳层，露出金属光泽，以免增加的碳导致热影响区冷裂纹。

3.8 外焊

清根后进行多层多道的外焊缝焊接，外焊前需进行 150~200 ℃的预热。控制好多层多道焊的层间温度不低于预热温度且不高于 200 ℃，整个焊接过程都应控制预热温度，保证层间温度，可增加扩散氢逸出时间，降低焊缝扩散氢含量。

3.9 焊后紧急消氢热处理及保温缓冷工艺

后热可以增加扩散氢的逸出，减少扩散氢的局部聚集，降低残余应力，同时对降低热影响区硬度非常重要。焊后采用履带加热片在焊缝周围

150 mm 范围进行消氢热处理，温度控制在 $(280 \pm 20)^\circ\text{C}$ ，后热时间最少 2 h，然后采用硅酸铝纤维毯覆盖保温缓冷。保温缓冷不仅防止冷裂纹效果好，且焊管车间现场操作方便，成本较低。

4 焊接接头试验结果分析

4.1 无损检测

焊接完成 48 h 后进行无损检测，无损检测采用超声和磁粉检测方法，超声波检测应特别注意横向裂纹缺陷的检测方法（采用 45° 小晶片斜探头沿磨平的焊缝或带余高表面做两个相对方向的扫查），磁粉检测采用磁轭法、非荧光湿连续法检测焊缝内外表面。检测结果满足 AWS D1.1/D1.1M 标准和技术规格书的要求。对焊缝进行外观检查，焊缝表面平滑过渡，无表面气孔和裂纹等缺陷。

4.2 理化性能试验

结合 AWS D1.1/D1.1M 标准关于焊接工艺评定及补充技术规范的要求，对焊接接头进行板状横向拉伸试验、导向弯曲（侧弯）试验、系列温度 $(-20^\circ\text{C}$ 、 -40°C 、 $-60^\circ\text{C})$ 冲击试验、宏观金相和硬度试验。

（1）拉伸试验。按照 AWS D1.1/D1.1M 标准，取样进行拉伸试验，试验结果见表 4。从表 4 可以看出，焊缝的抗拉强度均高于标准规定的母材抗拉强度，且断裂在母材区域。

表 4 EH690 焊接接头拉伸性能试验结果

试样			抗拉强度/ MPa	断裂位置
位置	取向	宽度/mm		
焊接接头	横向	25	820	母材
			835	母材

（2）导向弯曲试验。按照 AWS D1.1/D1.1M 标准，取样进行导向弯曲试验，弯曲试验采用侧弯代替正弯和反弯试验，取 4 个侧弯试样，弯轴直径 63.5 mm，弯曲角度 180° ，弯曲后观察受弯表面没有出现裂纹等缺陷，试样全部合格。

（3）冲击试验。按照 AWS D1.1/D1.1M 标准，取样进行夏比 V 形缺口冲击试验，按照标准和补充技术规范要求，分别取焊缝中心、熔合线、熔合线+2 mm 和熔合线+5 mm 处 4 组冲击试样，试样尺寸均为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 55\text{ mm}$ ，试

验温度采用标准规定和补充系列温度 $(-20^\circ\text{C}$ 、 -40°C 、 $-60^\circ\text{C})$ ，试验结果见表 5。由冲击试验结果可知，4 组试样各温度条件下冲击性能均满足标准要求，冲击功相比标准有较大的富余量。

表 5 EH690 焊接接头夏比冲击试验结果

取样位置	试验温度/ $^\circ\text{C}$	冲击功/J	
		单值	均值
焊缝中心	-20	92、94、95	94
	-40	98、73、102	91
	-60	91、82、71	81
熔合线	-20	150、185、167	167
	-40	165、184、130	160
	-60	120、178、100	133
熔合线+2 mm	-20	214、163、190	189
	-40	172、210、169	184
	-60	135、180、120	145
熔合线+5 mm	-20	270、299、272	280
	-40	217、210、150	192
	-60	181、231、140	184

（4）维氏硬度试验。EH690 高强钢焊接后最高硬度多出现在熔合线附近的热影响区，因此测得热影响区硬度值的大小对预测焊接接头的力学性能及开裂倾向有重要意义。通过对焊接接头取样进行维氏硬度试验，焊缝和热影响区的硬度和母材相当，说明热影响区没有出现软化和硬化现象，焊接工艺正确。维氏硬度试验打点位置如图 2 所示，试验结果见表 6。

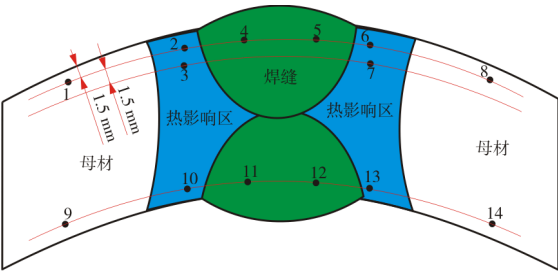


图 2 焊接接头维氏硬度试验压痕位置示意图

表 6 EH690 焊接接头硬度试验结果

测试点	HV ₁₀	测试点	HV ₁₀	测试点	HV ₁₀
1	263	6	245	11	246
2	243	7	254	12	253
3	223	8	278	13	203
4	273	9	257	14	239
5	269	10	225		

(5) 宏观金相试验。通过对焊接接头取样进行金相组织分析和宏观腐蚀检查, 焊缝成形良好, 平滑过渡, 焊缝完全焊透, 无裂纹和未熔合缺陷, 内外焊缝的重合量为 2.5 mm, 焊偏量 1 mm, 焊缝宏观形貌如图 3 所示。

在焊接热输入 $\leq 26 \text{ kJ/cm}$ 的情况下, 焊接接头组织形貌如图 4 所示。从图 4 可以看出, 焊缝组织以粒状贝氏体 ($B_{\text{粒}}$) 和针状铁素体 (IAF) 为主, 还包含有多边铁素体 (PF) 和珠光体 (P), 晶粒比较细小, 所以韧性较好; 熔合区以粒状贝

氏体 ($B_{\text{粒}}$) 和珠光体 (P) 为主, 韧性也较好; 细晶区以多边铁素体 (PF) 和珠光体 (P) 为主。

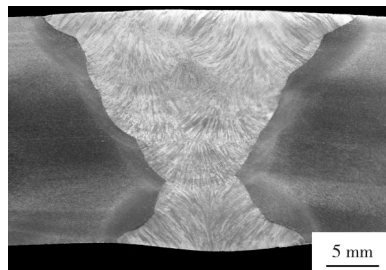
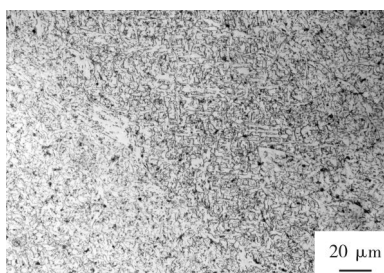
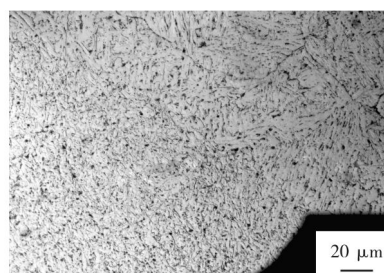


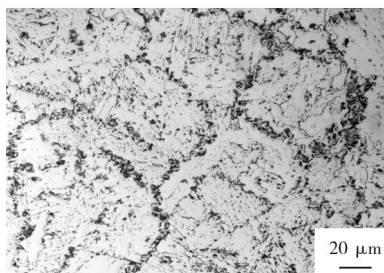
图 3 焊接接头横截面宏观形貌



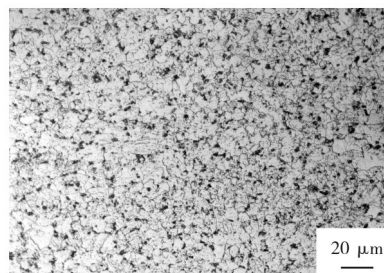
(a) 焊缝



(b) 焊趾区



(c) 熔合区



(d) 细晶区

图 4 EH690 钢焊接接头显微组织形貌

5 结束语

通过对 EH690 高强钢的焊接性分析, 制定了可靠的焊接工艺规范, 即采用富氩气体保护焊打底、埋弧焊填充盖面的工艺, 对焊管生产过程进行全面质量控制, 获得了性能优良的焊接接头, 焊管焊接接头的无损检测、理化性能试验结果完全满足标准和补充技术规范的要求。采用本研究工艺和质量控制措施实现了铺管船和起重机臂架用焊管的批量生产, 应用于 800~3 600 t 起重机、5 000 t 打捞船、7 500 t 全回转浮吊、8 000 t 双臂架浮吊等, 保证了浮吊的施工质量要求, 满足了浮吊臂架结构的使用安全。

参考文献:

- [1] 孙咸. Q690 高强钢焊接材料的选择及其应用[J]. 金属加工(热加工), 2016(18): 31-36.
- [2] 谭震国, 潘霖. Q690D 低合金高强钢焊接性能研究[J]. 重工与起重技术, 2010(4): 21-23.
- [3] 蒋红云. Q690 高强度圆钢管压弯相关性能的研究[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2013.
- [4] 李亚江, 暴一品, 蒋庆磊, 等. Q690 高强钢热影响区显微组织和性能研究[J]. 现代焊接, 2011(6): 12-14.
- [5] 邹增大, 李亚江, 尹士科. 低合金调质高强度钢焊接及工程应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [6] 张华军. 海工装备焊接横向裂纹产生机理及防控技术[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [7] 温志刚, 靳伟亮, 张剑利, 等. 海洋平台导管架卷管横向焊接裂纹性质分析[J]. 焊管, 2012(10): 36-38, 42.

(下转第 64 页)